外源酶制剂在反刍动物上的应用与展望

解祥学[1,2] 杜红方[1] 陈书琴[1] 汪兴玉[1,2] 王 敏[1] 陈东理[1] 任丽萍[2*]

（1.广东溢多利生物科技股份有限公司，珠海 519060；2.中国农业大学动物科技学院，动物营养学国家重点实验室，北京 100193）

摘 要:反刍动物能够将人类不能利用的粗饲料转化为优质蛋白质—肉和奶，这对农业以及人类社会有着重要意义。但是这种转化效率与植物细胞壁的消化率有重要关系，目前植物性原料消化率较低，影响了转化效率。在反刍饲粮中补充外源酶制剂具有提高植物纤维消化的潜力，从而提高饲粮的利用效率。本文总结了外源酶制剂应用现状、作用模式以及发展方向，认为目前外源酶制剂在反刍动物应用上有积极的结果，也存在效果不明显的报道，这可能与酶谱、添加水平、添加方式、底物类型以及宿主的生产水平等方面有关。同时阐述了外源酶制剂是在饲喂前、瘤胃中、瘤胃后的不同环境中起到作用，但详细机制还需要继续深入探究。综上所述，尽管酶制剂应用还存在一些问题，以提高饲料消化率为目标的酶制剂仍将会是反刍动物添加剂发展的一个重要方向。

关键词：外源酶制剂；反刍动物；瘤胃；植物细胞壁

中图分类号：S816.7

全球人口数量的增长及经济的持续发展，对高质量的肉、乳制品需求越来越多，这就对反刍动物利用粗饲料能力提出了更高的要求。因经济原因及维持瘤胃健康方面的考虑，粗饲料一直作为反刍饲粮的重要组成部分，但其在瘤胃的消化率不高于 50%，全消化道消化率不高于 65%[1-2]，因而限制了粗饲料的充分利用。近年来反刍动物用酶制剂一直处于研究应用的热点，尽管外源酶制剂的应用效果有一定的变异性，但反刍动物饲粮中添加外源酶制剂已公认是提高饲料利用率有效且经济的方式[3]。国内外很多学者进行了外源酶制剂在反刍上的应用研究[4-5]，目前主要集中在外源纤维素酶对纤维素的消化率、营养物质利用率、生产性能方面的影响，发现其可以改善干物质和纤维消化率[6]、增加奶产量[7-8]、提高日增重[9]，但也有应用效果不明显的报道[10]。鉴于酶制剂产品是未来反刍添加剂产品的重要方向之一，

收稿日期：2015-10-29
基金项目：农业部公益性行业（农业）专项（201503134）
作者简介：解祥学（1984-），男，江苏徐州人，博士，研究方向为反刍动物营养与饲料加工。E-mail: 282935225@qq.com
*通信作者：任丽萍，教授，博士生导师，E-mail: renlp@cau.edu.cn

本文的目的是对近年来反刍外源酶制剂的应用效果及可能作用途径加以综述，并提出酶制剂应用研究方向及方法，为进一步从根本上提高粗饲料的利用率，促进反刍动物养殖业可持续发展提供研究思路。

1 酶制剂中酶的来源

现在用于畜牧生产上的酶制剂，主要来源于真菌[曲霉属真菌(如米曲霉)、木霉属真菌、里氏木霉]和细菌（芽孢杆菌属、嗜酸乳酸杆菌属）等的发酵产物[2]。饲料工业用酶主要是通过接种、培养基生长，微生物发酵方式生产出来，尽管微生物来源、种群有限，但是由于菌株的选择、发酵底物以及培养状况不同，可能会产生不同的酶种[11]。

一般来讲，降解植物细胞壁结构性碳水化合物需要用复合的酶谱[12]，商业酶制剂目前通常考虑纤维素酶、木聚糖酶，其次蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶、果胶酶及阿魏酸酯酶等可能也会出现在的酶谱中。复合制酶制剂较为有优势，能够促使一系列底物发生反应，但不利于鉴别是哪种酶起到提高消化率的作用。目前普遍认为是单酶不一定适合单一或者某种特殊的饲料，但是如果采用复合酶则能适合一系列类型饲料[13]。

2 酶活评定

酶活的定义为在一定的时间、温度、pH 条件下，催化 1 单位量底物转化为产物需要的酶量[13]。就碳水化合物酶来讲，通常用产生的葡萄糖来衡量。在测定酶活时需要严格限定在一定的变量下，如温度、pH、离子强度、底物浓度、底物类型。一般用化学合成底物来测定酶活，通过染色以及光谱特性来测定。目前很大一部分酶活测定没有国标，很多企业用的是自己企标，因此在评价酶的质量时不能单纯靠酶活来评定，而主要应看应用效果。另外酶活测定方法不能够完全模拟消化道的状态，所用的底物也不是反刍动物所用的典型饲粮。因此这种分析方法可能会影响到外源酶制剂作为反刍饲料添加剂的应用。

在反刍动物推荐运用生物学的分析方法进行测定，主要包括两步法、产气量法、尼龙袋法等。在混有瘤胃微生物的培养管中，加入饲料底物，再加入酶，研究酶制剂对底物的降解情况，底物可以是谷物、干草、青贮或者秸秆等。如运用尼龙袋法，通过记录不同时间段营养物质消失量，可以计算出干物质、中性洗涤纤维（NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）等的有效降解速率。运用这种方式，根据消化效果可以筛选出较为合适的酶谱。但是体外法不能完全的模拟体内状态[14]，并且不能区分动物个体之间微生物的差异，通过体外结果完全外推

至整个机体的效果也存在不确定性。另外，体外法不能够说明外源酶制剂对饲料流通速率、瘤胃后营养物质的消化率等生理机能的影响。因此在评价外源酶制剂对反刍动物饲料利用率的影响方面，只有采用动物生产试验才能给出最真实的判断。

3 外源酶制剂对反刍动物生产性能的影响

3.1 奶牛

近年来在奶牛上进行大量的外源酶制剂应用研究，大多数是探究奶牛饲粮中添加外源酶制剂对产奶量以及乳成分的影响[5,15]。其中绝大多数产品是以纤维素酶或者木聚糖酶为主，也有少量蛋白酶及淀粉酶类产品。因为酶活的定义以及测定方法的不一致，不能把不同的试验按酶活为基础进行比较。另外即使酶活测定方法一致，也很难把酶的产品标准化，因为很多产品是复合酶，不能对所有的酶进行同时标准化，因此不同产品间不能单靠酶活进行比较，应主要看应用效果。

一部分研究发现，外源酶制剂可以改善奶牛的乳成分，Beauchemin 等[15]研究发现，给奶牛添加β-葡聚糖酶、木聚糖酶以及内切葡聚糖酶的复合酶可以提高奶牛2%的乳蛋白含量。同样 Sutton 等[16]、Eun 等[17]以及李艳玲等[18]也报道，添加外源复合酶能够提高牛奶中的乳蛋白或者乳脂的含量。此外也有一些研究表明，外源酶制剂可以增加产奶量[18]，Yang 等[19]发现向奶牛饲粮的干草中添加 2 g/kg 的纤维素酶和木聚糖酶复合物可以提高 1.9 kg/d 的产奶量，其原因可能是由于外源酶制剂提高了饲粮 12%的干物质消化率所致。也有研究发现，酶制剂可以改善机体健康状况，饲粮添加丙二醇及纤维素酶对奶牛产后能量负平衡有一定的改善作用，且以添加 0.5%丙二醇制剂效果相对更好[20]。尽管如此，在奶牛饲粮中添加外源酶制剂的效果存在比较大的差异，也有一些研究发现外源酶制剂并没有提高产奶量或者乳品质。Klingerman 等[21]研究发现，饲喂以苜蓿干草、苜蓿半干青贮、玉米青贮、混合豆科干草以及玉米青贮为底物的饲粮，淀粉酶不能改善乳产量及乳成分；Peters 等[22]发现外源酶制剂没有提高产奶量；Arriola 等[9]发现外源酶制剂没有改善乳品质。因此说酶的种类、底物类型、酶的剂量对酶的应用效果都有显著影响，需要对外源酶制剂应用技术进行进一步研究，以提高其应用的可靠性。

近年来一些研究提出，在做动物试验之前需要先做一些体内模拟试验，呼和等[23]筛选了以纤维素酶为主的复合酶制剂能够提高泌乳牛的产奶量，Holtshausen 等[24]通过体内试验

也筛选了 5 种添加水平的纤维素酶制剂，最后验证发现在添加量在 11.3%组可以提高校正乳产量。同样 Arriola 等[9]在用纤维素酶做饲养试验之前先通过体内试验进行了筛选，发现添加外源酶制剂可以提高低精料组的产奶量，而对高精料组没有影响。因此，在将外源酶制剂添加至奶牛饲粮时，需要先对添加的剂量及其方式仔细研究，然后选择合适的方式添加。运用体外法可以帮助筛选合适剂量以及预测生产性能，但是由于一些产品酶活会随时间延长而发生变化，并且很多商业产品只进行了有限次数和一定条件的研究，因此并不能保证对所有的奶牛产生同样的效果。

3.2 肉牛

尽管在 20 世纪 60 年代就有报道外源酶制剂可以提高肉牛的日增重，但是酶制剂在反刍上的应用一直比较缓慢，主要和价格较高以及效果不稳定有关[25]。现在随着酶发酵工艺的优化，在酶学性质及生产成本方面都有了显著改善，为酶制剂的生产应用提供了更为实用的基础。陈俊秋等[26]发现添加以纤维素酶为主的复合酶可以显著改善夏洛莱牛的日增重，但应用效果也存在变异，Beauchemin 等[27]发现阉割牛饲喂苜蓿干草或者梯牧草干草时添加木聚糖酶和纤维素酶产品因干物质的消化率的改善分别提高阉牛 30%、36%的日增重，但当饲喂大麦青贮时，添加酶制剂改善增重效果不明显。同时发现粗饲料的类型也显著影响最佳剂量，对于苜蓿草需要 0.25~1.0 L/t DM，而对于梯牧草干草需要 4 L/t DM。因此说外源酶制剂的效果是酶、剂量以及底物相互作用的结果。Beauchemin 等[28]在随后的研究发现，采用相同酶制剂配方，对于采食富含大麦高精料的阉牛能提高 11%的饲料转化效率，但对于采食玉米基础的高精料时没有效果。McAllister 等[29]也添加了相似的复合外源酶制剂，发现可以提高了阉牛的 10%的日增重，并显著改善 ADF 的消化率。这些研究表明，在以大麦谷物或者粗饲料为基础的饲粮，添加以木聚糖酶、纤维素酶为主的复合酶可以提高肉牛的日增重，但是对于以玉米饲粮或者大麦青贮为主的牧场，此酶谱的效果不明显。

此外淀粉酶的应用也存在变异性，Tricarico 等[30]报道 1 株由米曲霉分泌的淀粉酶能够以二次曲线方式提高肉牛的日增重，这种酶在碾碎玉米、高水分玉米以及玉米青贮饲粮中都有效，但对含有苜蓿干草、棉籽壳以及蒸汽压片玉米饲粮无效，并发现当肉牛饲粮采食受限制时，淀粉酶对日增重不再有效。DiLorenzo 等[31]也观察到淀粉酶添加量在 600 U/kg DM 饲粮时，对干轧玉米、蒸汽压片玉米都没有效果。对于淀粉酶的变异性，一方面需要进一步研究

不同菌种的淀粉酶对常用作为肉牛饲料的影响，另外一方面淀粉酶效果不明显，可能和谷物饲料已经被很好的加工，大部分淀粉都能很好在瘤胃内降解有关，因此外源酶制剂的效果体现不出来。

当然也有一部分研究发现外源酶制剂对肉牛效果不明显，Vera 等[32]发现在肉牛生长阶段添加蛋白酶，提高了肉牛 14.8%的干物质采食量，但是增快了瘤胃流通速率，降低了 4.1%的 NDF 消化率，因此并没有增加试验终体重。ZoBell 等[33]用以木聚糖和内切葡聚糖酶为主的酶制剂产品（5 580 和 15 880 U/kg DM），在粗精比为 65:35 的大麦型基础饲粮中添加，对日增重和饲料转化效率没有效果。但 McAllister 等[29]研究发现在以大麦青贮为粗饲料的情况下，生长期添加 0.5 L 的液体酶制剂，育肥期添加 3.5 L 液体酶制剂能够提高采食量和日增重，Balci 等[34]运用改进型纤维素酶及木聚糖酶 60 g 添加在玉米和大麦饲粮中发现可以提高日增重和饲料转化效率，因此，酶种的选择及底物类型对酶活的发挥有着重要作用。

此外酶处理时间也对应用效果有影响，Lewis 等[35]应用纤维素酶添加在干草和大麦型饲粮中，研究酶处理时间和饲粮精粗比对肉牛的影响，发现在饲喂前 24 h 加酶及饲喂前加酶均能提高干物质、NDF、ADF 消化率，但没有影响干物质采食量。同样，Krueger 等[36]研究不同时间段添加外源复合酶制剂对狗尾干草消化的影响，发现外源酶制剂在干草切碎后添加能够提高采食量，但是对终体重、日增重及饲料转化效率没有显著影响。另外有一些研究表明，将酶制剂添加至全混合日粮中能够发挥作用，从而提高日增重[29]，也有研究发现在精料中添加酶制剂也能够起到作用[34]，目前这 2 种添加方式均能够提高动物生产性能，还不能完全确定哪种添加方式最好。从上面应用研究可以看出饲喂前添加以纤维素酶、木聚糖酶为主的酶制剂可以起到较为理想的结果，通过增加酶与底物的接触时间也可以提高应用效果，但淀粉酶及蛋白酶在反刍上应用效果不明显。

3.3 羊

总体上来看，在羊上添加外源酶制剂应用效果不是很明显，Miller 等[37]将 1 种商业型的酶制剂添加至以大麦为基础饲粮的多赛特杂交羊中，发现此种酶制剂对干物质采食量、日增重、饲料转化率、羊毛产量等都没有显著影响，同样，Flores 等[38]也发现，在添加外源酶制剂的情况下对曼切加绵羊的产奶量、乳成分以及采食量均没有显著影响。此外 Rojo 等[39]饲喂来源于芽孢杆菌属和米曲霉的淀粉酶，发现其对萨福克羔羊的生产性能没有显著影响。

除了生产性能外，外源酶制剂对绵羊或者山羊的营养物质消化率影响也有报道。Reddish 等[40]研究发现复合酶制剂（4 g/头•d）对羔羊的干物质、ADF、NDF 以及氮的消化率没有显著影响；相似地，Giraldo 等[41]向美利奴羔羊瘘管中直接添加外源纤维素酶，发现没有影响饲粮的消化率，分析可能是因为直接向瘤胃中添加酶制剂减少了酶和饲料相互作用时间，从而影响了效果发挥。

尽管如此，小反刍动物应用上也有积极的报道。代行慧[42]研究发现向绵羊饲粮中添加纤维素酶以及与吐温-80 复合制剂可以提高瘤胃木聚糖酶、纤维素酶以及蛋白酶酶活，并在一定程度上提高饲料消化率。Bala 等[43]向萨能山羊中添加 2 个水平的纤维素酶（4 000、8 000 U/kg）和木聚糖酶（12 500、18 750 U/kg）复合酶，发现添加高水平组可以降低干物质采食量，增加干物质、有机物、粗蛋白质、NDF、ADF 的消化率，从而提高校正乳的产量。上述研究表明，在小反刍动物上外源酶制剂应用效果有限，表现为对羔羊没有效果，对泌乳山羊、成年羊有一定效果，另外应用效果也受到酶种、添加水平以及复合因素的影响。

4 外源酶制剂在反刍上可能的作用模式

目前应用在反刍上的外源酶制剂主要包括碳水化合物分解酶、蛋白质水解酶 2 大类，通过促进纤维类、蛋白质类的降解，从而提高饲料的降解率，外源酶制剂一般可能通过与饲料预作用、瘤胃中微生物的协作以及瘤胃后作用方式，提高饲料利用率，从而达到提高动物生产性能的效果。

4.1 饲喂前作用

外源酶制剂可增加可溶性糖含量。在饲喂前将外源酶制剂加入到饲粮中的效果最好，可以促进可溶性糖增加，但在青贮饲粮中可能会影响效果，因为青贮中某些成分可能会影响到酶活[44]。饲粮中仅需要含很少的水分即使如干草、谷物中水分就足以使酶分解饲粮中的多糖[45]。释放出的糖能够在一定程度上加快微生物的生长[15]，外源酶制剂和底物的类型共同决定了糖的释放程度，但是这些释放的糖仅占饲粮中总碳水化合物很少的一部分，因此这些有限的能量可能不能够很明显地改善动物生产性能。

充分结合饲料、减小酶活损失。酶与饲料紧密结合能够使酶较好地发挥活性，在一定程度上降低其在瘤胃中被失活的可能性。Bowman 等[46]研究发现当在压碎谷物饲料中（占饲粮比例为 45%）添加酶制剂比在预混料中添加酶制剂的效果要好。因此要最大限度发挥酶制

剂效果，需要让酶尽可能多地接触到饲粮，而且尽量添加在比例大的组分中，在全混合日粮中最好。

4.2 瘤胃中发挥作用

优化酶本身结构、提高稳定性。最初认为外源酶制剂会被瘤胃微生物分泌的酶降解，但现在发现外源酶制剂能够在瘤胃中稳定存在[2,45]，如 Morgavi 等[47]发现 4 种商业酶制剂能够在瘤胃液、胃蛋白酶以及胰液中稳定存在。外源酶制剂在瘤胃稳定特性可能和酶的糖基化有关，同时也与其提前加入饲料中酶活得到稳定和提高有关，另外一些特殊微生物区系产生的酶即使没有糖基化也可以阻止瘤胃液对其的水解作用[48]。外源酶制剂活对瘤胃的稳定性有重要意义，这种稳定性可能会影响到外源酶制剂在反刍动物生产性能表达上的差异性。

增强瘤胃酶活、提高消化率。外源酶制剂能提高反刍动物饲粮的消化率，但很少提高饲料的消化程度，表明这些能够导致动物发挥较好生产性能的酶制剂，并不是因为它们提高了饲粮中不易消化组分的消化程度，而是提高了能够消化组分的消化率。外源酶制剂不仅能够提高某些酶针对的特殊组分的消化率，更能够提高瘤胃中总酶活，提高瘤胃总水解能力，从而提高饲粮各个组分的消化率[15]。这也就解释了在添加纤维素酶制剂产品时能够同时提高纤维以及非纤维组分的消化率。

促进细菌依附，协作发挥功能。添加外源酶制剂与瘤胃固有酶相比仅为其中的一小部分，很难解释瘤胃中纤维降解度的提高是由于外源酶制剂的直接作用。因此推测可能是由于外源酶制剂与瘤胃微生物酶之间协作关系，以及提高瘤胃微生物对植物纤维的依附作用。尽管机制不清楚，外源酶制剂可能通过提高细菌对纤维的依附，使牢固的纤维胶束中的氢键断裂，从而促进纤维素的降解[49]。但是外源酶制剂的增加可能会和瘤胃微生物竞争饲料结合位点[45]。这也解释了随着外源酶制剂量的增加为什么会出现负面效果的原因。因此说外源酶制剂如果要发挥好的效果，需既要保证酶活，又不能完全取代瘤胃自然条件下已经存在的酶活。

降低黏性、提高采食量。Choct[50]研究发现，酶能够降低家禽消化物的黏性，如果在反刍动物上也有相似降低消化物黏性的特点，就能够提高瘤胃内容物的流通速率，降低胃肠道的充盈性，提高采食量。提高采食量对于改善动物生产性能有重要意义，但如果酶在瘤胃中随内容物迅速流出，会导致没有足够时间降解瘤胃中饲粮的纤维，进入瘤胃后绝大部分酶活在低 pH、胃蛋白酶的作用下很快失活，不能再发挥作用，因此外源酶制剂的添加需要控制

在合理的范围内，一方面能够降低黏度，提高采食量，同时可以改善消化率。

4.3 瘤胃后作用

外源酶制剂在瘤胃后的作用主要是提高瘤胃后酶活，促进饲料降解、营养物质吸收。Hristov 等[51]最先报道约有 30%的木聚糖酶能够逃逸出反刍动物的瘤胃到达小肠，这个结论与在研究猪时的结果相一致。当添加水平较高时，其他酶制剂也可能通过瘤胃，增加多聚糖在小肠中营养物质的降解程度。一般认为真胃因其较低的 pH 和胃蛋白酶能够阻止外源酶制剂进入小肠，但也有报道发现酶能够穿过真胃。Morgavi 等[47]认为一些外源酶制剂可以在瘤胃发酵液及真胃的环境中存活，也能在小肠液中存活一段时间，同时在粪便中多糖降解能力随酶活呈线性增加趋势[52]。对于单酶来讲，在瘤胃和真胃中木聚糖酶活性优于纤维素酶，因此在小肠液中木聚糖酶酶活高于纤维素酶。目前外源酶制剂对瘤胃后的作用研究较少，后期需要对不同的酶过瘤胃效果及作用方式进行探究，以期最大限度地提高营养物质消化率。

理论上讲，外源酶制剂可以通过提高瘤胃中碳水化合物降解能力，降低消化道内容物的黏性以及提高瘤胃后营养物质吸收的方式来提高动物的生产性能，但现在外源酶制剂在瘤胃后的实际效果还不清晰，目前认为主要是从通过对瘤胃功能的改善而起到作用，瘤胃后作用需要进一步研究。

5 外源酶制剂在反刍动物中的应用展望

随着集约化规模化程度的不断提高，降低生产成本、提高经济效益、同时降低环境污染，将是反刍动物牧场发展的方向，因此绿色添加剂将会有良好前景。以提高营养物质消化率尤其以提高粗饲料利用率的外源酶制剂将会发挥重要作用，但反刍外源酶制剂还需要继续研究以期达到最佳状态，结合生产应用实际状况建议从以下几个方面进行深入研究。

5.1 运用新技术研究瘤胃和外源酶制剂协作关系

利用 DNA 以及 RNA 序列分析一些新技术，深入了解瘤胃微生物区系的结构和功能。运用宏基因组组学、蛋白质组学，进一步探究外源酶制剂和内源微生物协作方式，提高外源酶制剂添加的针对性和效率。进而从机理上、生理上明确外源酶制剂降解植物细胞壁，提高反刍动物饲料利用率的方式[53]。

5.2 选择合适的外源酶种

根据反刍动物消化生理及饲粮构成特点，在瘤胃中应主要选择纤维素酶、木聚糖酶，因

为二者主要将纤维素、半纤维素降解为六碳糖和戊碳糖，进一步再分解为挥发性脂肪酸，从而被机体利用。但不建议在瘤胃中添加淀粉酶、脂肪酶和蛋白酶，因淀粉本身在瘤胃中很易大量分解，添加外源淀粉酶效果可能不明显，其次反刍动物饲粮脂肪含量较低，不需要添加脂肪酶。另外一般要求在满足瘤胃能氮平衡的基础上要增加过瘤胃蛋白质，所以瘤胃中也不需要添加蛋白酶，但可以考虑在瘤胃后的消化道增添蛋白酶，来提高蛋白质的整个消化道的消化率。近年来一些研究发现阿魏酸酯酶对降解半纤维素和木质素之间的阿魏酸酯键有重要作用，并能够提高饲料细胞壁的降解[54]，后期需要进一步生产试验验证。以上表明需要根据反刍动物生产及生理的实际状况，选择合适酶谱才能起到事半功倍效果。

5.3 复合外源酶制剂协作发挥作用

充分认识反刍动物外源酶制剂的特点，选择合适的辅助添加剂，以期达到最佳生产效果。外源酶制剂能够在一定程度上提高饲料消化率，改善生产性能，但也有自身的局限性，如果再辅助一些反刍动物用其他添加剂，如微生态、维生素制剂协同发挥作用，能够进一步改善动物机体健康，提高饲料利用率，从而能够达到更加理想的生产应用效果。

6 小 结

外源酶制剂在反刍动物中的应用处于方兴未艾阶段，目前应用虽然有一定的变异性，尤其在小反刍动物方面应用效果还不明显，另外酶制剂本身也存在一定缺陷，如耐酸碱性不强、耐温性不稳定，但今后如能采用新技术，如宏基因、优化的体外模拟方法充分了解外源酶制剂的性质、作用机理，在酶源筛选、酶谱选择、应用方式以及复合制剂等方面进行改进，从而达到理想的应用效果，相信以生态、绿色为特点的外源酶制剂将会在反刍动物生产上能发挥更加重要的作用。

参考文献：

[1] 周汉林,莫放,李琼,等.日粮不同蛋白水平对生长牛营养物质消化率的影响[J].河北农业大学学报,2006,29(1):82–86.

[2] 张芹,毛胜勇,朱伟云.外源酶在反刍动物生产中的应用及作用机制[J].畜牧与兽医,2007,39(5):55–58.

[3] 徐学文,刘正亚,田雯,等.不同的复合酶制剂对奶牛生产性能和营养物质消化率的影响[J].粮食与饲料工业,2012(11):51–54.

[4] TRICARICO J M,JOHNSTON J D,DAWSON K A.Dietary supplementation of ruminant diets with an *Aspergillus oryzae* a-amylase[J].Animal Feed Science and Technology,2008,145(1/2/3/4):136–150.

[5] HRISTOV A N,BASEL C E,MELGAR A,et al.Effect of exogenous polysaccharide-degrading enzyme preparations on ruminal fermentation and digestibility of nutrients in dairy cows[J].Animal Feed Science and Technology,2008,145(1/2/3/4):182–193.

[6] GADO H M,SALEM A Z M,ROBINSON P H,et al.Influence of exogenous enzymes on nutrient digestibility,extent of ruminal fermentation as well as milk production and composition in dairy cows[J].Animal Feed Science and Technology,2009,154(1/2):36–46.

[7] 韩兆玉,段智勇,丁立人,等.酶制剂对奶牛产奶量和乳品质的影响[J].粮食与饲料工业,2008(8):39–40.

[8] BEAUCHEMIN K A,RODE L M,KARREN D.Use of feed enzymes in feedlot finishing diets[J].Canadian Journal of Animal Science,1999,79(2):243–246.

[9] ARRIOLA K G,KIM S C,STAPLES C R,et al.Effect of fibrolytic enzyme application to low- and high-concentrate diets on the performance of lactating dairy cattle[J].Journal of Dairy Science,2011,94(2):832–841.

[10] GASHE B A.Cellulase production and activity by Trichoderma sp.A-001[J].Journal of Applied Bacteriology,1992,73(1):79–82.

[11] MORGAVI D P,KELLY W J,JANSSEN P H,et al.Rumen microbial (meta) genomics and its application to ruminant production[J].Animal,2012,7(Suppl.):184–201.

[12] BEAUCHEMIN K A,COLOMBATTO D,MORGAVI D P,et al.Use of exogenous fibrolytic enzymes to improve feed utilization by ruminants[J].Journal of Animal Science,2003,81(14S2):E37–E47.

[13] HRISTOV A N,LEE C,HRISTOVA R A,et al.A meta-analysis of the variability in continuous-culture ruminal fermentation and digestibility data[J].Journal of Dairy Science,2012,95(9):5299–5307.

[14] BEAUCHEMIN K A,COLOMBATTO D,MORGAVI D P,et al.Mode of action of

exogenous cell wall degrading enzymes for ruminants[J].Canadian Journal of Animal Science,2004,84(1):13–22.

[15] BEAUCHEMIN K A,RODE L M,MAEKAWA M,et al.Evaluation of a nonstarch polysaccharidase feed enzyme in dairy cow diets[J].Journal of Dairy Science,2000,83(3):543–553.

[16] SUTTON J D,PHIPPS R H,BEEVER D E,et al.Effect of method of application of a fibrolytic enzyme product on digestive processes and milk production in Holstein-Friesian cows[J].Journal of Dairy Science,2003,86(2):546–556.

[17] EUN J S,BEAUCHEMIN K A.Effects of a proteolytic feed enzyme on intake,digestion,ruminal fermentation,and milk production[J].Journal of Dairy Science,2005,88(6):2140–2153.

[18] 李艳玲,张民,柴建民,等.外源性复合酶制剂对体外瘤胃发酵及奶牛产奶性能的影响[J].动物营养学报,2015,27(9):2911–2919.

[19] YANG W Z,BEAUCHEMIN K A,RODE L M.Effects of an enzyme feed additive on extent of digestion and milk production of lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,1999,82(2):391–403.

[20] 陈连民,陈前岭,王梦芝,等.纤维素酶和丙二醇对产后奶牛能量负平衡相关血清指标的影响[J].动物营养学报,2014,26(12):3829–3835.

[21] KLNGERMAN C M,HU W,MCDONELL E E,et al.An evaluation of exogenous enzymes with amylolytic activity for dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2009,92(3):1050–1059.

[22] PETERS A,LEBZIEN P,MEYER U,et al.Effect of exogenous fibrolytic enzymes on ruminal fermentation and nutrient digestion in dairy cows[J].Archives of Animal Nutrition,2010,64(3):221–237.

[23] 呼和,孙海州,徐桂梅,等.以纤维酶为主的复合酶对乳牛生产性能的影响[J].饲料博览,2001(3):4–6.

[24] HOLTSHAUSEN L,CHUNG Y H,GERARDO-CUERVO H,et al.Improved milk production efficiency in early lactation dairy cattle with dietary addition of a developmental fibrolytic enzyme additive[J].Journal of Dairy Science,2011,94(2):899–907.

[25] BURROUGHS W,WOODS W,EWING S A,et al.Enzyme additions to fattening cattle rations[J].Journal of Animal Science,1960,19:458–464.

[26] 陈俊秋,赖来展,陈春洪,等.三高 1 号复合酶制剂喂牛效果试验[J].广东农业科学,1997(6):44–45.

[27] BEAUCHEMIN K A,RODE L M,SEWALT V J H.Fibrolytic enzymes increase fiber digestibility and growth rate of steers fed dry forages[J].Canadian Journal of Animal Science,1995,75(4):641–644.

[28] BEAUCHEMIN K A,JONES S D M,RODE L M,et al.Effects of fibrolytic enzymes in corn or barley diets on performance and carcass characteristics of feedlot cattle[J].Canadian Journal of Animal Science,1997,77(4):645–653.

[29] MCALLISTER T A,OOSTING S J,POPP J D,et al.Effect of exogenous enzymes on digestibility of barley silage and growth performance of feedlot cattle[J].Canadian Journal of Animal Science,1999,79(3):353–360.

[30] TRICARICO J M,ABNEY M D,GALYEAN M L,et al.Effects of a dietary *Aspergillus oryzae* extract containing α-amylase activity on performance and carcass characteristics of finishing beef cattle[J].Journal of Animal Science,2007,85(3):802–811.

[31] DILORENZO N,SMITH D R,QUINN M J,et al.Effects of grain processing and supplementation with exogenous amylase on nutrient digestibility in feedlot diets[J].Livestock Science,2011,137(1/2/3):178–184.

[32] VERA J M,SMITH H,ZOBELL D R,et al.Effects of an exogenous proteolytic enzyme on growth performance of beef steers and *in vitro* ruminal fermentation in continuous cultures[J].The Professor of Animal Scientist,2012,28(4):452–463.

[33] ZOBELL D R,WIEDMEIER R D,OLSON K C,et al.The effect of an exogenous enzyme treatment on production and carcass characteristics of growing and finishing steers[J].Animal Feed Science and Technology,2000,87(3/4):279–285.

[34] BALCI F,DIKMEN S,GENCOGLU H,et al.The effect of fibrolytic exogenous enzyme on fattening performance of steers[J].Bulgarian Journal of Veterinary Medicine,2007,10(2):113–118.

[35] LEWIS G E,HUNT C W,SANCHEZ W K,et al.Effect of direct-fed fibrolytic enzymes on the digestive characteristics of a forage-based diet fed to beef steers[J].Journal of Animal Science,1996,74(12):3020–3028.

[36] KRUEGER N A,ADESOGAN A T,STAPLES C R,et al.Effect of method of applying fibrolytic enzymes or ammonia to *Bermudagrass* hay on feed intake,digestion,and growth of beef steers[J].Journal of Animal Science,2008,86(4):882–889.

[37] MILLER D R,ELLIOTT R,NORTON B W.Effects of an exogenous enzyme,Roxazyme® G_2,on intake,digestion and utilisation of sorghum and barley grain-based diets by beef steers[J].Animal Feed Science and Technology,2008,145(1/2/3/4):159–181.

[38] FLORES C,CAJA G,CASALS R,et al.Performance of dairy ewes fed diets with a fibrolytic enzyme product included in the concentrate during the suckling period[J].Animal,2008,2(6):962–968.

[39] ROJO R,MENDOZA G D,GONZÁLEZ S S,et al.Effects of exogenous amylases from *Bacillus licheniformis* and *Aspergillus niger* on ruminal starch digestion and lamb performance[J].Animal Feed Science and Technology,2005,124:655–665.

[40] REDDISH M A,KUNG L Jr.The effect of feeding a dry enzyme mixture with fibrolytic activity on the performance of lactating cows and digestibility of a diet for sheep[J].Journal of Dairy Science,2007,90(10):4724–4729.

[41] GIRALDO L A,TEJIDO M L,RANILLA M J,et al.Influence of direct-fed fibrolytic enzymes on diet digestibility and ruminal activity in sheep fed a grass hay-based diet[J].Journal of Animal Science,2008,86(7):1617–1623.

[42] 代行慧.吐温-80 和纤维素酶对绵羊作用的研究[D].硕士学位论文.哈尔滨:东北农业大学,2007.

[43] BALA P,MALIK R,SRINIVAS B.Effect of fortifying concentrate supplement with fibrolytic enzymes on nutrient utilization,milk yield and composition in lactating goats[J].Animal Science Journal,2009,80(3):265–272.

[44] WALLACE R J,WALLACE S J A,MCKAIN N,et al.Influence of supplementary fibrolytic

enzymes on the fermentation of corn and grass silages by mixed ruminal microorganisms *in vitro*[J].Journal of Animal Science,2001,79(7):1905–1916.

[45] MORGAVI D P,NEWBOLD C J,BEEVER D E,et al.Stability and stabilization of potential feed additive enzymes in rumen fluid[J].Enzyme and Microbial Technology,2000,26(2/3/4):171–177.

[46] BOWMAN G R,BEAUCHEMIN K A,SHELFORD J A.The proportion of the diet to which fibrolytic enzymes are added affects nutrient digestion by lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2002,85(12):3420–3429.

[47] MORGAVI D P,BEAUCHEMIN K A,NSEREKO V L,et al.Resistance of feed enzymes to proteolytic inactivation by rumen microorganisms and gastrointestinal proteases[J].Journal of Animal Science,2001,79(6):1621–1630.

[48] FONTES C M G A,HALL J,HIRST B H,et al.The resistance of cellulases and xylanases to proteolytic inactivation[J].Applied Microbiology and Biotechnology,1995,43(1):52–57.

[49] 刘大森,鞠涛,杨方,等.纤维素酶在反刍动物饲料中的应用研究进展[J].东北农业大学学报,2011,42(6):7–11.

[50] CHOCT M.Enzymes for the feed industry:past,present and future[J].World’s Poultry Science Journal,2006,62(1):5–16.

[51] HRISTOV A N,MCALLISTER T A,CHENG K J.Effect of dietary or abomasal supplementation of exogenous polysaccharide-degrading enzymes on rumen fermentation and nutrient digestibility[J].Journal of Animal Science,1998,76(12):3146–3156.

[52] HRISTOV A N,MCALLISTER T A,CHENG K J.Intraruminal supplementation with increasing levels of exogenous polysaccharide-degrading enzymes:effects on nutrient digestion in cattle fed a barley grain diet[J].Journal of Animal Science,2000,78(2):477–487.

[53] MEALE S J,BEAUCHEMIN K A,HRISTOV A N,et al.Board-invited review:opportunities and challenges in using exogenous enzymes to improve ruminant production[J].Journal of Animal Science,2014,92(2):427–442.

[54] 谢春元,杨红建,黎大洪.细胞壁降解相关酶以及在反刍动物应用中活性测定标准化的建

议[J].家畜生态学报,2007,28(6):108–112.

Application and Outlook of Exogenous Enzymes in Ruminants

XIE Xiangxue[1,2] DU Hongfang[1] CHEN Shuqin[1] WANG Xingyu[1,2] WANG Min[1] CHEN Dongli[1] REN Liping[2*]

(1. *Guangdong VTR Bio-Tech. Co., Ltd., Zhuhai* 519060, *China; 2. State Key Laboratory of Animal Nutrition, College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing* 100193, *China*)

Abstract: Ruminants can convert forage that human can’t use directly to high quality protein-meat and milk, which is important to agriculture and human society. However, the conversion efficiency is dependent on digestibility of plant cell walls. The digestibility of plant material is low at present. It is potential to improve plant fiber digestibility that supplementing ruminant diets with exogenous enzymes, and thus improve the efficiency of feed utilization. This review summarized the application status, modes of action, and development directions of exogenous enzymes. The effects of exogenous enzymes in ruminants had variability, which might be due to enzyme array, addition level, addition mode, substrate type and host productive level. Exogenous enzymes acted in different environments, such as before feeding, in rumen and post-rumen, however, the exactly mechanism needed more investigation. In general, exogenous enzymes that used to enhance the feed digestibility would be one of most important ruminant additives in the future, though they had variability at present.

Key words: exogenous enzyme; ruminant; rumen; plant cell wall

∗Corresponding author, professor, E-mail: renlp@cau.edu.cn

（责任编辑　王智航）